

コバルトとパラジウムから成る薄膜界面にて磁化を膜垂直方向に揃える
界面電子軌道の形が明らかに
— スピン軌道工学に道 —

1. 発表者：

岡林 潤（東京大学 大学院理学系研究科附属スペクトル化学研究センター 准教授）
三浦 良雄（物質材料研究機構 磁性・スピントロニクス材料研究拠点 独立研究者）
宗片比呂夫（東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆ 薄膜のコバルト層とパラジウム層の界面にて、薄膜の面に垂直な方向に磁石の向きが揃うメカニズムを明らかにしました。
- ◆ 薄膜界面のコバルトとパラジウムの電子軌道の形を、放射光を用いた磁気分光法（X線磁気円二色性）による元素別スペクトルの計測と理論計算から明らかにしました。特に、2つの元素に関して同条件で測定できる方法により、精密な測定に成功しました。
- ◆ コバルトとパラジウムの界面でのスピンと軌道の相互作用から垂直に磁化が揃うことを実証しました。本結果は界面原子の中の電子スピンと電子軌道を利用したスピン軌道工学（スピンオービトロニクス）の新しい研究に繋がることが期待されます。

3. 発表概要：

東京大学大学院理学系研究科の岡林潤准教授、物質材料研究機構の三浦良雄独立研究者、東京工業大学の宗片比呂夫教授による研究チームは、コバルト（Co）とパラジウム（Pd）の薄膜界面に膜垂直方向に磁石の性質が生じるメカニズムについて、放射光（注1）を用いたX線磁気円二色性（XMCD、注2）と第一原理計算（注3）により明らかにしました。特に、CoとPd原子内の電子軌道の形を明確にし、元素によって異なる役割を担っていることを実証しました。得られた結果は、磁性体と非磁性体が接合した界面に誘起される磁性に関する基礎物理学の理解を進展させるのみでなく、スピンを操作して低消費電力にて動作するスピントロニクス素子の設計においても重要な役割を果たすことが期待されます。

CoとPdの界面では、両元素の磁気的な相互作用により、膜面に垂直方向に磁化が揃うことが知られています。また、膜に垂直方向に磁化する材料は大容量の磁気記録デバイスには不可欠なものとして、スピントロニクス分野では研究されています。研究チームは、CoとPdの接する界面原子中の電子軌道の形を明確にし、Coでは外殻3d電子軌道の異方性が支配的であり、Pdでは外殻4d電子軌道には異方性がなく、3d系とは異なる四極子相互作用の形をとっていることが判りました。これを調べるためには、元素別に磁気状態を調べる必要があり、放射光を用いた元素選択的な磁性の検出手法が不可欠です。愛知県岡崎市にある分子科学研究所極端紫外光研究施設（UVSOR）のビームラインBL4Bにて

XMCD の測定を行いました。また、実験の一部は茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構放射光施設（フォトンファクトリー）において、東京大学大学院理学系研究科スペクトル化学研究センターが所有するビームライン(BL-7A)にて測定を行うことにより、Co と Pd の軌道の異方性を明確にできました。実験結果は、第一原理に基づく理論計算とも一致し、界面に誘起される新しい磁性材料の創出に繋がることが期待されます。

本成果は、2018年5月29日(英国夏時間午前10時)に、英国科学雑誌「Scientific Reports」のオンライン版に掲載されます。なお、本研究は科研費基盤研究(S)「界面スピン軌道結合の微視的解明と巨大垂直磁気異方性デバイスの創製」、科研費基盤研究(B)「外場摂動印加時の磁気分光を用いた軌道磁気モーメントの操作に関する研究」の助成を受けて実施されました。

4. 発表内容：

強磁性体と非磁性体を交互に堆積した構造（磁気接合）は、磁気メモリーなどの記録素子やハードディスク内の磁気センサーとして広く用いられています。特に、薄膜の面に垂直方向に磁化の向きを揃えて磁気記録を行う技術は、高記録密度を達成するために重要です。これらの素子の最適化を進めることは、スピントロニクスの研究分野におけるデバイス開発では最も重要なことの一つです。磁石は本来、膜に平行方向に磁化が揃うことでエネルギーが低くなり安定します。一方、膜に垂直方向に揃う方が安定する Co/Pd 界面のような特殊な物質も存在します。Co/Pd 界面は、Co の磁石としての性質、Pd の重い元素としての性質が合わさって垂直磁化を示します。しかし、強磁性体 Co と非磁性体 Pd が接合した界面にて磁化が垂直方向に誘起される電子論的なメカニズムについて、今まで明確ではありませんでした。特に、Pd のスピン軌道相互作用が重要な役割を果たすとされてきましたが、軌道の役割については詳細については調べられていませんでした。

研究チームは、電子軌道が作る磁気モーメントを調べられる XMCD に着目しました。特に、Co と Pd を 1 回の測定にて、同条件で比較できる特徴があることに着目し、軌道の異方性を詳細に調べました。方位に依存した軌道磁気モーメントの分布をそれぞれの元素について調べ、Co では異方的な分布をしており、Pd では等方的な分布であることが判りました。この解釈は、XMCD のみでなく、第一原理計算により明らかになりました。特に、界面の Co と Pd 原子中の電子の軌道混成により、Co の軌道磁気モーメントが膜垂直方向に大きくなることを見出しました。また、Pd 原子中の電子では、スピンの反転した状態が四極子のように分布していることが安定であることを見出しました。これらのことは、Fe や Co などの磁石の性質を持つ 3d 元素と Pd, Pt などの貴金属の元素の性質が合わさって出現する垂直磁化の起源に迫るものであり、今後のデバイス設計に向けた界面の電子状態の理解に指針を与えるものとなります。

本研究は、磁気記録やスピントロニクスの研究にて広く用いられている CoPd を用いた材

料設計、素子設計を行う上で、極めて重要な指針を与えるものです。また、近年注目を集めている界面でのトポロジカルな性質の観測、操作にも有用な研究基盤になりうるものです。垂直磁化を用いた高記録密度を可能にする素子設計、近接効果がもたらす界面での誘起磁性に関する研究の進展が期待されます。今後、界面のスピンと軌道状態を人工的に設計することができ、今までにない新しい磁石の性質の操作に関する研究が拓けるものと期待されます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「 *Scientific Reports* 」

論文タイトル：Anatomy of interfacial spin-orbit coupling in Co/Pd multilayers using X-ray magnetic circular dichroism and first-principles calculations

著者：岡林潤、三浦良雄、宗片比呂夫

6. 注意事項：

日本時間 5 月 29 日（火）午後 6 時（現地英国夏時間 5 月 29 日（火）午前 10 時）以前の公表は禁じられています。

7. 問い合わせ先：

（研究に関すること）

東京大学大学院理学系研究科 スペクトル化学研究センター
准教授 岡林 潤（おかばやし じゅん）

TEL：03-5841-4418 E-mail：jun@chem.s.u-tokyo.ac.jp

※海外出張中のため、メールでご連絡ください。

（報道に関すること）

東京大学 大学院理学系研究科・理学部 広報室

TEL：03-5841-0654 E-mail：kouhou.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp

東京工業大学 広報・社会連携本部 広報・地域連携部門

TEL：03-5734-2975 E-mail：media@jim.titech.ac.jp

8. 用語解説：

注1 放射光

電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、電磁石によって進行方向を曲げた時に発生する、指向性が高く強力な電磁波のこと。遠赤外から可視光線、軟 X 線を経て硬 X 線に至る幅広い波長域で放射光を得ることができるため、原子核の研究からナノテクノロジー、バイオテクノロジー、産業利用や科学捜査まで幅広い研究が行われている。タンパク質の結晶構造解析の分野でも大きな成果をあげている。

注2 X線磁気円二色性 (XMCD : X-ray Magnetic Circular Dichroism)

放射光から出る左右円偏光により元素の内殻から遷移する吸収スペクトルを測定する。左右円偏光による各元素の吸収強度の違いが XMCD である。これにより、元素別の磁気状態について知ることができる。

注3 第一原理計算

物質を構成する基本粒子である原子核と電子の運動、及びその間に働く相互作用のみを入力パラメータとして物質の性質を探る物理計算手法。実験とは独立して近似の範囲内では非常に高精度に、物質の物性を計算することができる。

9. 添付資料：

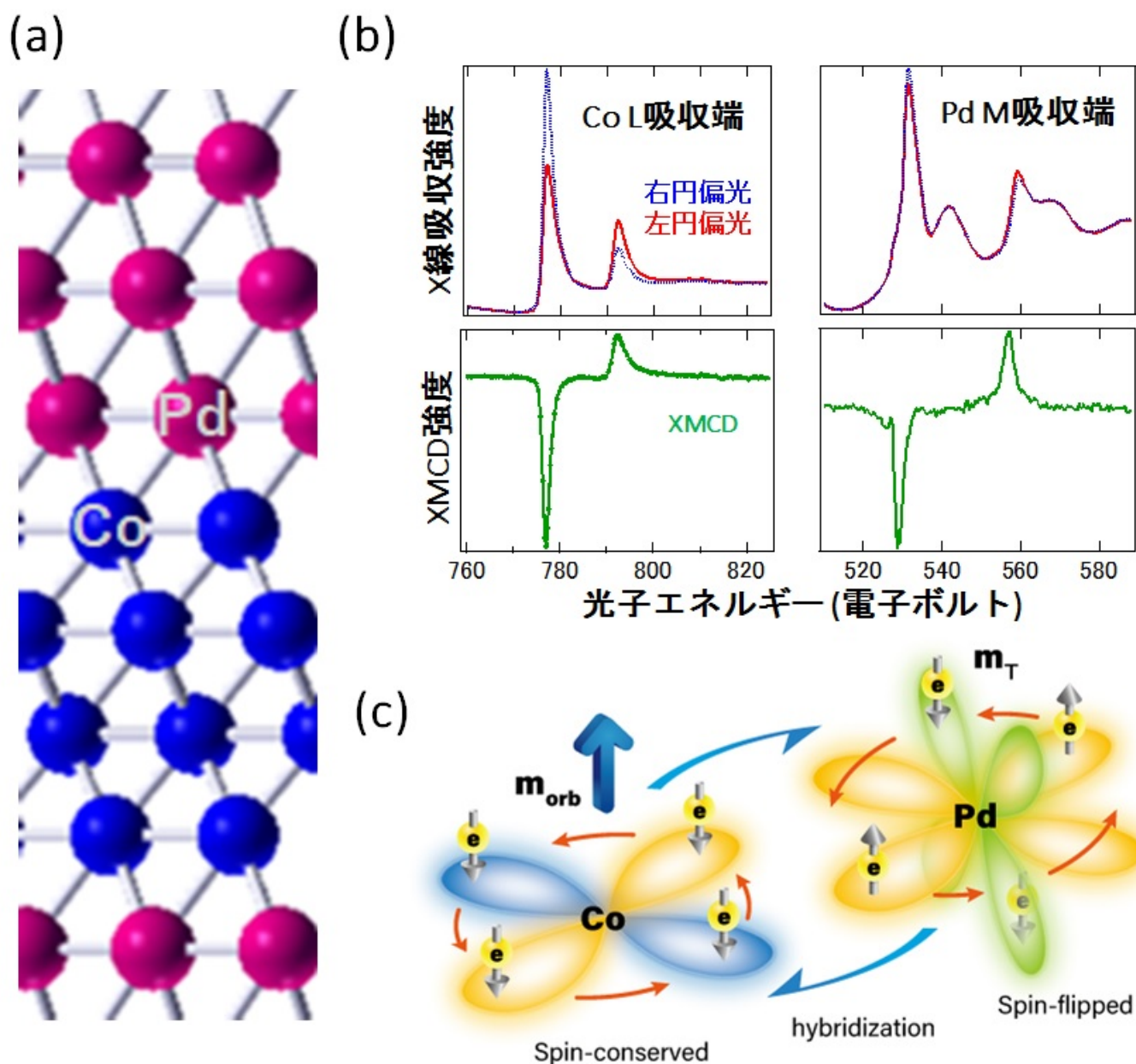


図1 (a) 設計した構造の模式図。Co と Pd 層が原子レベルで堆積している。(b) Co, Pd の各元素における円偏光による X 線吸収スペクトル (上段)と X 線磁気円二色性スペクトル (下段)。赤 (実線) と青 (点線) は左右円偏光の違いに相当する。(c) XMCD および第一原理計算から得られた界面近傍の Co と Pd 原子の軌道状態の模式図。